

Hubungan Morfologi, Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA) Cement

Wiwik Dwi Pratiwi^{1*}

¹ Program Studi Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

wiwik.pratiwi@ppns.ac.id

Abstract — Penggunaan fly ash sebagai bahan substitusi semen menarik untuk dioptimalkan sebagai bahan bangunan berkarbon rendah (*low carbon footprint materials*), misalnya *high-volume fly ash (HVFA) cement*. Kuat tekan pasta semen HVFA dipengaruhi oleh sifat-sifat fly ash yang digunakan. Studi ini membahas tentang morfologi, ukuran partikel dan keamorfian fly ash serta hubungannya dengan kuat tekan pasta semen HVFA. Morfologi fly ash diamati dengan *scanning electron microscopy (SEM)*, ukuran partikel dihitung dengan *SEM-particle metric*, sedangkan keamorfian fly ash dianalisis berdasarkan data X-ray diffraction (XRD). Pasta semen HVFA dibuat dengan mencampur 20% semen Portland dengan 80% fly ash. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar fly ash tersusun atas partikel-partikel yang berbentuk bola dan sebagian kecil mempunyai bentuk tak beraturan. Semakin banyak partikel fly ash yang berbentuk tak beraturan, maka semakin kecil keamorfian fly ash, serta makin rendah kuat tekan pasta semen HVFA. Kuat tekan pasta semen HVFA ditentukan oleh efek filler, efek pengenceran dan efek kimia fly ash.

Kata kunci—*High-volume fly ash; compressive strength; filler effect; dilution effect; pozzolanic*

I. PENDAHULUAN

Semen Portland merupakan bahan yang paling banyak digunakan sebagai *binder* untuk konstruksi. Di sisi lain, industri semen menghasilkan terbesar ke tiga setelah bahan bakar fosil dan perubahan peruntukan lahan. Pada tahun 2016, emisi global proses produksi semen sebesar $1,45 \pm 0,20$ Gt CO₂, setara dengan 4% emisi dari bahan bakar fosil (Andrew, 2018). Salah satu cara untuk mencobaatasi masalah tersebut adalah menurunkan kadar klinker dalam semen (International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, 2018) yaitu dengan substitusi semen dengan bahan pengganti atau dikenal sebagai *supplementary cementitious materials (SCM)*. Pemanfaatan fly ash (FA) sebagai SCM dengan dosis rendah atau menengah sudah lama diterapkan pada dosis yang relatif rendah (sekitar 15%). Beberapa decade belakangan fly ash digunakan dalam dosis yang lebih tinggi, (di atas 50%) dan dikenal sebagai *high-volume fly ash (HVFA) cement* (Mehta, 2004; Huang dkk., 2013). Penggunaan fly ash sebagai SCM tidak hanya memberikan keuntungan ekologis, namun bisa meningkatkan ketahanan struktur pada lingkungan agresif, misalnya laut (Moffatt, Thomas dan Fahim, 2017).

Fly ash dikenal sebagai bahan pozzolan, yaitu bahan kaya silika atau kaya silika dan alumina, yang mana serbuk halus tersebut dan ada air, maka bahan tersebut bereaksi secara kimia dengan Ca(OH)₂ pada suhu kamar membentuk senyawa yang mempunyai sifat semen (ASTM, 2010). Tantangan besar aplikasi FA sebagai SCM adalah kualitasnya yang sangat

bervariasi, sedangkan kekuatan semen atau beton HVFA sangat dipengaruhi oleh sifat FA.

Standar ASTM C 618 (ASTM, 2010) mengklasifikasikan fly ash menjadi 2 kelas yaitu kelas F dan C berdasarkan kadar oksida Si, Al, dan Fe. Standar tersebut juga memberikan syarat strength activity index (SAI) untuk menentukan reaktivitasnya dengan semen dengan mengukur kekuatannya. Namun, hal tersebut belum mampu menggambarkan hubungan sifat fly ash dengan perannya dalam menyumbangkan kekuatan pada semen atau beton HVFA (Bentz, 2013).

Lam dkk. (2000) menemukan bahwa kuat tekan pasta yang dibuat dari campuran ordinary Portland cement (OPC) – FA ditentukan oleh volume gel hasil reaksi yang mana hal tersebut tergantung pada derajat reaksi, baik untuk semen maupun fly ash. Hal yang sama juga dilakukan oleh Deschner dkk. (2013) yang mengukur kuantitas fly ash yang bereaksi dengan teknik *back-scattered SEM*. Penelitian-penelitian tersebut mengkaji hasil reaksi fly ash yang memberikan kekuatan, namun tidak menelaah karakteristik fly ash yang menentukan reaktivitasnya.

Fernández-Jimenez dkk. (2003) melakukan karakterisasi fly ash sebagai bahan baku untuk aktivasi alkali dan merekomendasikan fly ash yang menghasilkan bahan binder yang kuat adalah yang memiliki kandungan tak terbakar kurang dari 5%; kadar Fe₂O₃ tidak lebih dari 10%; kadar CaO rendah; kadar silika reaktif antara 40-50%; persentase partikel berukuran kurang dari 45 µm antara 80-90% dan memiliki kadar fase amorf yang besar. Peneliti yang sama lebih lanjut menemukan bahwa untuk ukuran partikel, komposisi oksida dan kadar silika reaktif yang hampir sama, reaktivitas fly ash untuk aktivasi alkali lebih ditentukan oleh kadar amorfnya, yaitu semakin reaktif jika komposisi fase amorf lebih besar (Fernández-Jimenez dkk., 2006).

Scrivener (2015) melakukan karakterisasi fly ash dan mengukur derajat reaksi fly ash dengan teknik SEM - EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy). Penelitian tersebut memprediksi komposisi unsur fly ash serta komposisi unsur terhidrat, sehingga bisa diketahui % volume fly ash yang bereaksi. Namun demikian, metode yang diterapkan tidak membedakan fase amorf dan kristal pada fly ash.

Bhagath Singh dan Subramaniam (2018) melakukan perhitungan kadar amorf total, silika total, silika amorf, alumina total dan alumina amorf menggunakan gabungan melakukan teknik XRF (X-Ray Fluorescence), XRD (X-Ray Diffraction). Peneliti ini juga mengamati morfologi fly ash, namun tidak menghubungkan dengan kadar amorf total pada fly ash.

Penelitian ini melengkapi penelitian-penelitian terdahulu sebagaimana diuraikan di atas, yaitu mengkaji hubungan antara morfologi partikel fly ash dengan kadar amorfnya. Sifat fly ash tersebut dikaitkan dengan kuat tekan HVFA.



II. MATERIAL DAN METODE

A. Material

Bahan baku dalam penelitian ini tiga macam fly ash yang diambil dari PLTU yang berbeda. Tabel 1 menampilkan komposisi oksida FA yang diukur dengan XRF. Loss on ignition (LOI) ditentukan dengan pemanasan 1000°C selama 1 jam (Wesche, 2004).

Tabel 1. Komposisi Oksida dan LOI fly ash

Oksida, % berat	Fly Ash		
	A PC	B PT1	SRL2
SiO ₂	44.00	47.30	39.83
Al ₂ O ₃	36.69	26.06	23.76
Fe ₃ O ₄	4.50	10.27	13.51
CaO	5.32	6.29	11.83
Na ₂ O	1.32	1.00	2.14
K ₂ O	0.55	1.79	0.84
MgO	6.50	3.40	4.80
TiO ₂	0.42	1.14	1.06
Cr ₂ O ₃	0.01	0.09	0.01
MnO ₂	0,08	0.09	0,2
SO ₃	0.37	0.40	1.16
LOI	1.60	2.00	10.20

Fly ash A, B dan C semua termasuk fly ash kelas F berdasarkan ASTM C618 karena jumlah oksida SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₃O₄ lebih dari 70%. Perbedaan yang cukup besar adalah kadar Fe₃O₄, CaO dan LOI fly ash C lebih tinggi dibandingkan fly ash A maupun B.

B. Metode

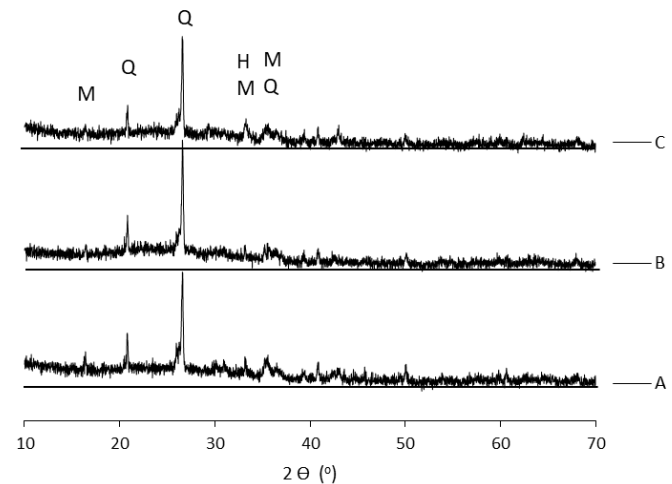
Penentuan kadar amorf fly ash ditentukan dengan XRD dengan perangkat lunak Match!. Pengujian XRD dilaksanakan di Departemen Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Morfologi fly ash diamati dengan teknik SEM. Pengujian SEM dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Pasta semen HVFA dibuat dengan mencampurkan secara kering 80% FA dengan 20%OPC, kemudian dimasukkan ke wadah berisi air dan diaduk selama sekitar 4 menit. Perbandingan massa air terhadap massa campuran kering untuk semua campuran adalah 0,27. Selanjutnya pasta dituangkan ke dalam cetakan berbahan akrilik berbentuk silinder dengan diameter 2 cm, tinggi 4 cm. Cetakan dibuka setelah 24 jam. Sampel pasta kemudian dibungkus dengan kain basah di dalam kemasan plastik yang rapat dan dibuka menjelang diujitekan. Pengujian tekan dilakukan pada umur 7, 28 dan 150 hari. Uji tekan dilaksanakan di Laboratorium

Teknik Beton dan Bahan Bangunan, Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

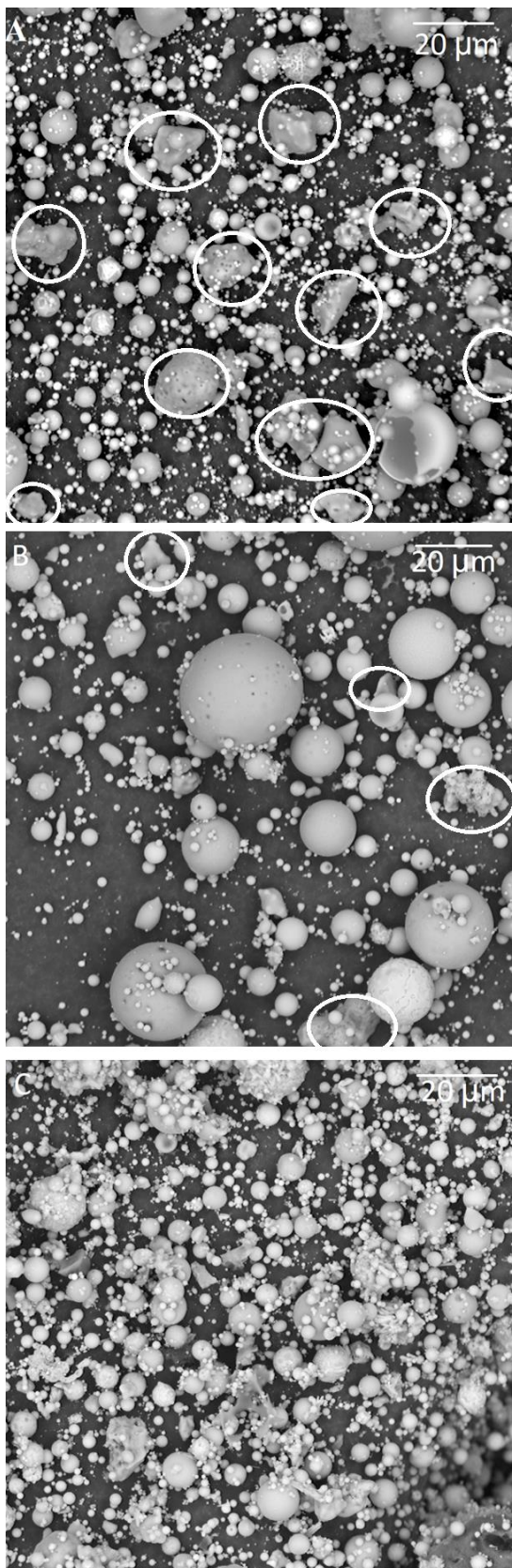
Gambar 1 menampilkan pola XRD fly ash A, B dan C.



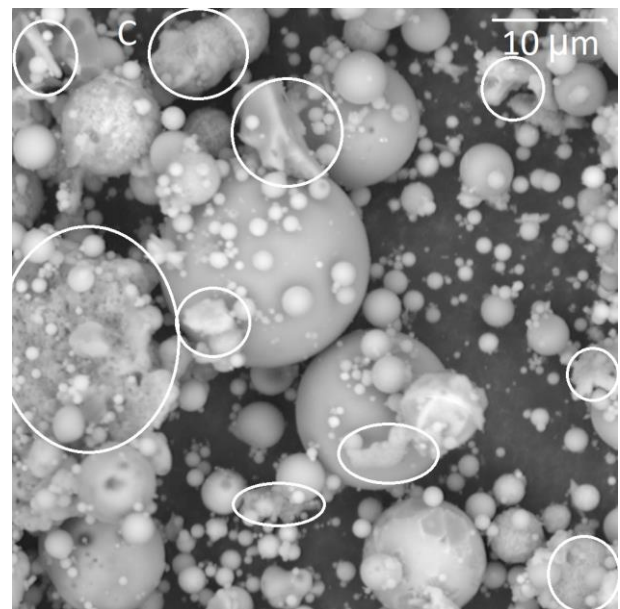
Gambar 1. Pola XRD fly ash A, B, C. (Q: quartz; M: mullite; H: hematite)

Pola XRD ketiga fly ash mempunyai *hump* (punuk) dan puncak-puncak pada 2θ tertentu menunjukkan bahwa fly ash tersusun atas bahan-bahan yang amorf dan kristal. Dengan software Match! posisi puncak mengindikasikan fase kristal quartz, mullite dan hematite dan untuk fly ash A, B, dan C masing-masing memiliki keamorfan 65,81%, 75,02% dan 57,07%.





Gambar 2. Morfologi fly ash A (atas), B (tengah) dan C (bawah) diamati dengan SEM (2000x)

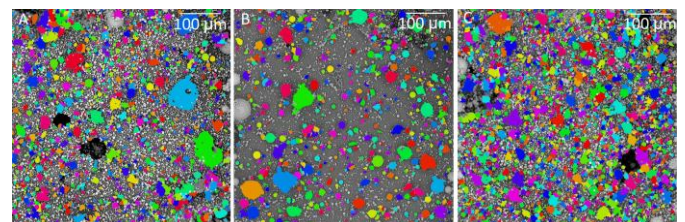


Gambar 3. Morfologi fly ash C diamati dengan SEM (5000x)

Gambar 2 menampilkan morfologi fly ash yang diamati dengan SEM. Tanda lingkaran digunakan untuk menunjukkan partikel yang mempunyai bentuk tidak beraturan. Untuk menggambarkan perbandingan jumlah partikel maka digunakan istilah banyak (>50%), sedang (25-50%) dan sedikit (5-25%) dan jarang (<5%). Partikel fly ash A banyak yang berbentuk bulat, sedangkan yang berbentuk tak beraturan jumlahnya sedang. Fly ash B banyak yang berbentuk bulat dan sedikit yang berbentuk tak beraturan.

Partikel yang mempunyai bentuk tak beraturan pada fly ash A mempunyai ukuran yang lebih besar dibandingkan partikel berbentuk bulat, namun hal ini tidak berlaku pada fly ash B. Pada fly ash A, partikel dengan bentuk tak beraturan terdiri atas partikel dengan bentuk bangun bersudut dan bola yang tidak bulat sempurna.

Fly ash C memperlihatkan partikel berbentuk bulat dan tak beraturan jumlahnya berimbang. Secara lebih jelas, gambar fly ash C ditampilkan dengan pembesaran yang lebih besar pada Gambar 3. Partikel dengan bentuk tak beraturan mempunyai bentuk yang lebih bervariasi.

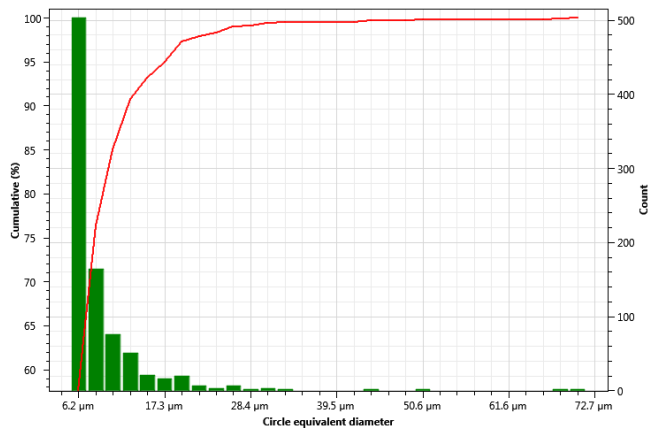


Gambar 4. Gambar partikel fly ash yang diambil dari perangkat lunak Particlemetric

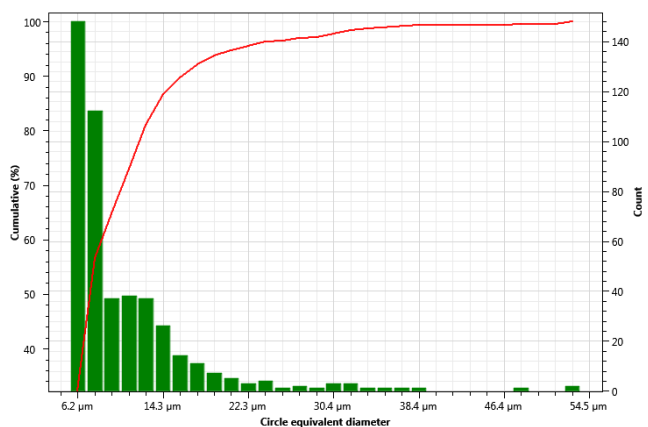
Untuk mengetahui perbandingan ukuran partikel, maka digunakan perangkat lunak *Particlemetric* yang menyatu



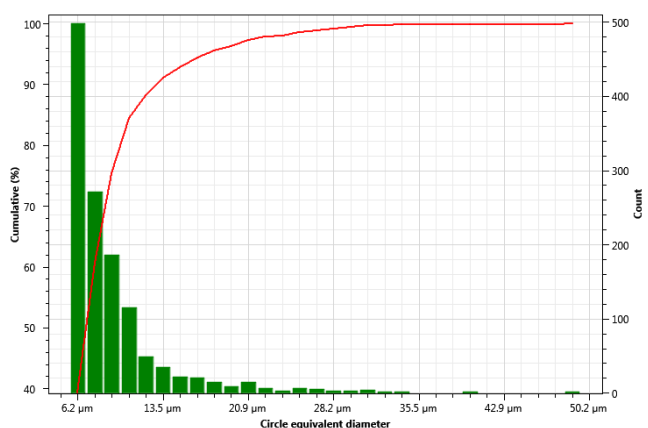
dengan SEM. Gambar 4 menampilkan gambar partikel yang diolah dengan perangkat lunak tersebut, sedangkan Gambar 5 menampilkan distribusi ukuran partikel.



Gambar 5a. Distribusi ukuran partikel fly ash A



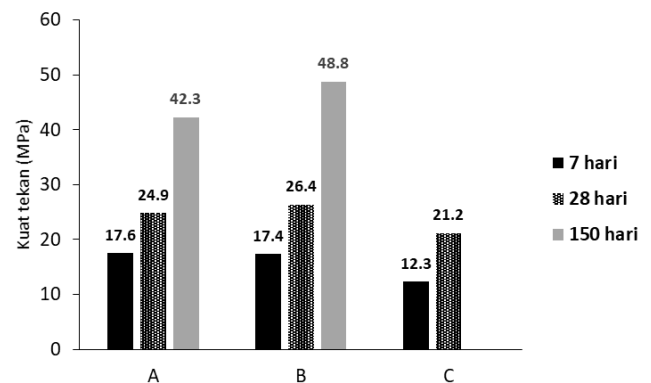
Gambar 5b. Distribusi ukuran partikel fly ash B



Gambar 5c. Distribusi ukuran partikel fly ash C

Dari Gambar 5 bisa dibaca, 90% dari fly ash A, B, dan C berturut-turut mempunyai ukuran maksimal 12,86 µm, 15,9

µm dan 13,5 µm. Luaran lain dari perangkat lunak *Particlemetric* adalah diameter rata-rata partikel fly ash A, B, dan C, yaitu masing-masing 38,1µm, 30,7 µm dan 20,9 µm.



Gambar 6. Kuat tekan pasta HVFA umur 7, 28 dan 150 hari

Gambar 6 menampilkan kuat tekan pasta HVFA. Pada umur 7 hari, kuat tekan pasta A hampir sama dengan pasta B. Pada umur 28 hari, kuat tekan B sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan pasta A. Perbedaan kuat tekan semakin besar pada umur pasta 150 hari. Pasta C memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan pasta A dan B baik pada umur 7 maupun 28 hari.

Ketika semen dicampur dengan air, maka terjadi reaksi hidrasi dengan hasil utama kalsium silikat hidrat (ditulis sebagai C-S-H) dan Ca(OH)_2 . C-S-H merupakan sumber kekuatan pasta semen (Taylor, 1997). Pada sistem OPC-fly ash, selain reaksi hidrasi terjadi juga reaksi pozzolanik. Reaksi ini diawali dengan serangan ion OH^- terhadap SiO_2 atau $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ pada fly ash menghasilkan monosilikat dan monoaluminat. Monosilikat dan monoaluminat kemudian bereaksi dengan kalsium membentuk C-S-H atau C-A-S-H (kalsium silikat aluminat hidrat) yang memberikan tambahan kekuatan (Shi dan Day, 2000).

Substitusi fly ash terhadap semen memberikan efek filler, efek pengenceran, dan efek kimia. Efek filler ditentukan oleh ukuran partikel dan afinitas fase C-S-H terhadap partikel filler. Efek pengenceran adalah kenaikan rasio air terhadap semen efektif jika sebagian semen disubstitusi oleh fly ash. Semakin banyak persentase yang disubstitusi, maka semakin tinggi rasio efektif air terhadap semen dan hal ini mendukung kesempurnaan reaksi hidrasi (Aydin dan Arel, 2017). Efek kimia ditentukan oleh reaktivitas kimia fly ash untuk bereaksi secara pozzolanik menghasilkan fasa yang memberikan kontribusi kekuatan.

Jika fly ash yang disubstitusikan mempunyai ukuran yang lebih kecil dibandingkan ukuran partikel semen, maka masuknya partikel fly ash menyebabkan jarak antar partikel menjadi pendek. Ini merupakan efek filler. Partikel fly ash juga berperan sebagai tempat terbentuknya endapan C-S-H hasil reaksi hidrasi semen. Semakin pendek jarak antar partikel, maka semakin rapat fase C-S-H yang terbentuk sehingga kekuatan semakin tinggi. Bisa dikatakan, efek filler



fly ash memberikan percepatan terhadap hidrasi semen. Ilustrasi substitusi partikel yang berukuran lebih kecil terhadap jarak antar partikel telah dijelaskan oleh Pratiwi dkk (2020).

Efek kimia ditentukan oleh kemudahan fly ash bereaksi menghasilkan fase C-S-H atau C-A-S-H. Fase tersebut terbentuk ketika bagian amorf dari fly ash terserang ion hidroksil yang berasal dari $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil reaksi hidrasi semen. Untuk campuran 80% OPC-20% FA, diperlukan waktu hidrasi sekitar seminggu agar dihasilkan pH yang cukup untuk menyerang fly ash (Fraay dkk., 1989). Untuk kadar semen yang lebih rendah, waktu yang diperlukan bisa lebih lama. Bisa dikatakan, pada pasta umur 7 hari, efek filler memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan efek kimia.

Kekuatan pasta semen C umur 7 hari paling kecil di antara pasta lainnya (Gambar 6), padahal fly ash C tersusun atas partikel dengan diameter rata-rata yang paling kecil. Hasil ini bertentangan dengan teori efek filler yang mana semakin kecil partikel maka semakin efektif dalam mempercepat reaksi hidrasi semen sehingga diduga ada faktor lain yang berpengaruh. Sebagaimana telah dicantumkan pada Tabel 1, fly ash C mempunyai LOI yang paling tinggi, yaitu 10,20%. LOI berkorelasi dengan karbon yang tak terbakar. Semakin tinggi kadar LOI, berarti semakin tinggi kadar karbon yang tidak terbakar. Karbon tidak terbakar memiliki permukaan yang luas dan porous sehingga menyerap banyak air. Hal ini berdampak pada kenaikan *water demand* yaitu perbandingan jumlah air yang diperlukan pada pasta yang disubstitusi fly ash dengan jumlah air pada pasta semen biasa untuk mencapai konsistensi yang sama (Wesche, 2004). Fly ash A, B, dan C menggunakan perbandingan berat air yang sama. Pada fly ash C, sebagian air diserap oleh karbon tidak terbakar, sehingga bagian air yang secara efektif bereaksi dengan semen menjadi lebih rendah dibandingkan dengan fly ash A dan B. Hal ini diduga menjadi penyebab rendahnya kuat tekan fly ash C pada umur 7 hari dibandingkan fly ash A dan B. Bisa dikatakan efek pengenceran fly ash C lebih kecil dibandingkan fly ash A dan B.

Kuat tekan umur 7 hari pasta A sedikit lebih tinggi dibandingkan pasta B. Jika dilihat dari komposisi oksida dan LOI (Tabel 1), perbedaan utama adalah kadar Fe_3O_4 dan CaO fly ash B lebih tinggi dibandingkan dengan fly ash A, namun LOI antara keduanya hampir sama. Sebagaimana telah dibahas di atas, LOI memberikan pengaruh terhadap efek pengenceran, sehingga antara fly ash A dan B bisa dikatakan tidak dipengaruhi efek pengenceran. Diameter rerata fly ash A sedikit lebih kecil dibandingkan fly ash B, hal ini sesuai dengan data yang menunjukkan kuat tekan pasta A sedikit lebih tinggi dibandingkan pasta B.

Kuat tekan umur 28 hari dan 150 hari fly ash B tampak lebih tinggi dibandingkan fly ash A (Gambar 6). Pada umur lanjut, maka efek kimia mulai terjadi sebagai hasil interaksi fly ash dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil hidrasi semen. Reaksi ini disebut sebagai reaksi pozzolanik. Dengan mengasumsikan laju hidrasi semen sama antara pasta A dan B, maka perbedaan kekuatan disebabkan karena sumbangan kekuatan pasta oleh

reaksi pozzolanik berbeda antara fly ash A dan B. Prinsip umum dalam reaksi kimia adalah semakin tinggi konsentrasi maka reaksi berjalan semakin cepat. Kuat tekan pasta B yang lebih tinggi dibandingkan pasta A menunjukkan fly ash B mampu menyediakan silika dan alumina terlarut yang lebih tinggi dibandingkan fly ash B. Di dalam fly ash, silika dan alumina terikat sebagai quartz, mullite atau bagian amorf. Lebih lanjut fasa amorf bersifat lebih reaktif dibandingkan fase kristal, sehingga banyaknya silika dan alumina terlarut ditentukan oleh kadar amorf dari fly ash, bukan oleh kadar oksida silika dan alumina total.

Hasil XRD menunjukkan fly ash A, B dan C masing-masing memiliki keamorfian 65,81%, 75,02% dan 57,07%. Berdasarkan data ini maka fly ash yang secara kimia paling berpotensi menyumbangkan kekuatan adalah fly ash B dengan kadar amorf terbesar. Analisis ini sesuai dengan data yang mana kuat tekan pasta B lebih tinggi dibandingkan pasta A. Pada pengamatan morfologi dengan SEM, fly ash A memiliki bentuk tak beraturan yang lebih banyak dibandingkan fly ash B. Bisa disimpulkan bahwa semakin besar bagian fly ash yang berbentuk bola, maka fly ash tersebut memiliki derajat keamorfian yang lebih tinggi.

Fly ash C mempunyai derajat keamorfian yang paling rendah, sehingga bisa dikatakan fly ash C paling tidak reaktif. Bisa dinyatakan kuat tekan pasta C yang paling rendah dibandingkan pasta yang lain disebabkan oleh dua hal, yang pertama rasio air-semen efektif lebih rendah karena sebagian air diserap oleh karbon tak bereaksi, dan yang kedua ketersediaan silika dan alumina terlarut relatif kecil karena persen amorf yang rendah. Jika dihubungkan dengan morfologi, tampak fly ash C mempunyai banyak partikel dengan bentuk tak beraturan (Gambar 2 dan 3).

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas, bisa ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sistem campuran semen-fly ash, kekuatan pasta ditentukan oleh gabungan hasil reaksi hidrasi semen dan hasil reaksi pozzolanik fly ash.
2. Substitusi fly ash terhadap semen memberikan tiga macam pengaruh yaitu efek filler, efek pengenceran, dan efek kimia atau reaksi pozzolanik.
3. Efek filler dipengaruhi oleh ukuran partikel sedangkan efek pengenceran pada rasio air-semen yang sama dipengaruhi oleh LOI. Kedua efek ini mempengaruhi reaksi hidrasi semen dan teramati pada umur awal semen (7 hari).
4. Semakin besar bagian fly ash yang berbentuk bola maka derajat keamorfian fly ash semakin tinggi dan fly ash semakin reaktif.
5. Reaksi pozzolanik fly ash ditentukan oleh kadar amorf fly ash, yang mana semakin tinggi kadar amorf maka kontribusi kuat tekan pasta dari reaksi pozzolanik fly ash semakin besar.



SARAN

Pengukuran distribusi partikel dengan metode SEM – Particlemetric perlu dibandingkan dengan metode lain misalnya dengan teknik Laser Granulometry.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada: Kepala dan Teknisi Lab Beton dan Bahan Bangunan- Departemen Teknik Sipil ITS untuk fasilitas pengujian pasta; Kepala dan Teknisi Lab. Karakterisasi Material, Departemen Material dan Metalurgi, ITS untuk fasilitas pengujian XRD; Kepala dan Lab SEM Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya untuk pengujian SEM.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrew, R. M. (2018) 'Global CO₂ emissions from cement production', *Earth System Science Data*, 10, pp. 195–217. doi: <http://dx.doi.org/kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/10.5194/essd-10-195-2018>.
- ASTM (2010) 'ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.01, Cement; Lime; Gypsum', Annual Book of ASTM Standards, pp. 3–6. doi: 10.1520/C0618.
- Aydin, E. and Arel, H. Ş. (2017) 'Characterization of high-volume fly-ash cement pastes for sustainable construction applications', *Construction and Building Materials*, 157, pp. 96–107. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.089.
- Bentz, D. P. (2013) NIST Technical Note 1812 Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes : Assuring Properties and Performance.
- Bhagath Singh, G. V. P. and Subramaniam, K. V. L. (2018) 'Characterization of Indian fly ashes using different experimental techniques', *Indian Concrete Journal*, 92(3), pp. 10–23.
- Deschner, F. et al. (2013) 'Quantification of fly ash in hydrated, blended Portland cement pastes by backscattered electron imaging', *Journal of Microscopy*, 251(2), pp. 188–204. doi: 10.1111/jmi.12061.
- Fernández-Jimenez, A. et al. (2006) 'Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity', *Fuel*, 85(5–6), pp. 625–634. doi: 10.1016/j.fuel.2005.08.014.
- Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A. (2003) 'Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements', *Fuel*, 82(18), pp. 2259–2265. doi: 10.1016/S0016-2361(03)00194-7.
- Fraay, A. L. A., Bijen, J. M. and de Haan, Y. M. (1989) 'The Reaction of Fly Ash in Concrete . A Critical Examination', *Cement and Concrete Research*, 19, pp. 235–246.
- Huang, C. et al. (2013) 'Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 46, pp. 71–78. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016.
- International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development (2018) Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. OECD/International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development. <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4586/61682> (Diakses pada tanggal 29 Nov. 2018).
- Lam, L., Wong, Y. L. and Poon, C. S. (2000) 'Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems', *Cement and Concrete Research*, 30(5), pp. 747–756. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00213-1.
- Mehta, P. K. (2004) 'High Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainability Development', in *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. Beijing, pp. 3–14.
- Moffatt, E. G., Thomas, M. D. A. and Fahim, A. (2017) 'Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 102(September), pp. 127–135. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.09.008.
- Pratiwi, W. D. et al. (2020) 'Combination of precipitated-calcium carbonate substitution and dilute-alkali fly ash treatment in a very high-volume fly ash cement paste', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 234, p. 117273. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117273.
- Scrivener, K. L. (2015) 'A New Quantification Method Based on SEM- EDS to Assess Fly Ash Composition and Study the Reaction of its Individual Component in Hydrating Cement Paste', *Cement and Concrete Research*, 75(July), pp. 111–122. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.02.008.
- Shi, C. and Day, R. (2000) 'Pozzolanic reaction in the presence of chemical activator: Part II Reaction product and mechanism', *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 19–27.
- Taylor, H. F. W. (1997) *Cement Chemistry*. 2nd edn. London: Thomas Telford Publishing.
- Wesche, K. (2004) RILEM REPORT 7: Fly Ash in Concrete: Properties and Performance. Edited by K. Wesche. E & FN Spon/ Chapman & Hall.

